

文章编号: 1007-4627(2011)01-0195-05

# LS301 快中子探测器的效率刻度<sup>\*</sup>

张文慧<sup>1,2</sup>, 黎光武<sup>1, #</sup>, 张刚<sup>1,3</sup>, 陈宇<sup>1</sup>, 闫果红<sup>1,4</sup>

(1 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

3 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

4 山西师范大学现代物理研究所, 山西 临汾 041004)

**摘要:** 主要介绍了利用<sup>252</sup>Cf 标准裂变中子能谱刻度快脉冲 LS301 型液闪中子探测器的探测效率的实验方法和结果, 简要介绍了实验数据的处理过程, 得到了阈值分别为 0.5, 0.7, 1.0 和 1.6 MeV, 以及中子能量在 10 MeV 以下的探测器效率, 并对测量结果进行了误差分析。同时为了检验实验结果的准确性, 将实验结果与理论计算结果进行比较, 两者在不确定度范围内符合得很好。

**关键词:** <sup>252</sup>Cf 电离室; LS301 快中子探测器; 中子探测效率; 飞行时间

**中图分类号:** TL816.3

**文献标识码:** A

## 1 引言

液体闪烁体(简称液闪)探测器以其发光衰减时间短、透明度好、容易制备和成本低廉等优点, 被广泛应用于快中子测量领域。LS301 型液闪中子探测器具有输出脉冲上升时间短和在中子飞行时间测量方法中具有定时精确的特点。但目前对它的效率刻度工作比较少, 而中子探测器的探测效率是实验测量中至关重要的参数。

液体闪烁体探测器的中子探测效率与中子能量、阈值、闪烁体的尺寸及液闪成份等有关。中子探测器的效率刻度方法有很多, 在测量几十 keV 到十几 MeV 能量范围内的探测器的探测效率时, 常用的方法有 n-p 散射方法<sup>[1-2]</sup>, 但这种方法比较繁琐, 如需要准确确定散射角, 扣除在 C 上的非弹性散射影响等。

一个比较简单的方法<sup>[3]</sup>是用一个已精确知道中子能谱的同位素中子源, 作为一个中子标准场, 实验测量在此中子场下中子探测器对不同中子能量的响应, 便可获得在很宽中子能量范围内准确的探测效率。本研究工作使用<sup>252</sup>Cf 微型电离室法测量 LS301 液体闪烁体的中子探测效率, 电离室本身的物质非常少, 其对<sup>252</sup>Cf 中子能谱的影响也相当少。

1971 年国际原子能机构(IAEA)<sup>[4]</sup>正式推荐<sup>252</sup>Cf 自发裂变瞬发中子能谱为标准裂变中子能谱, 1986 年召开的关于<sup>252</sup>Cf 裂变中子能谱的顾问会议<sup>[5]</sup>上, 一致认为 1979 年之后各家实验数据在 0.2—20.0 MeV 能区的实验数据已经符合得很好, 而且谱的形状、数据的质量已经达到了很好的确定标准谱的水平。其裂变谱可以用核温度 1.42 MeV 的 Maxwellian 谱描述, 这样使得用<sup>252</sup>Cf 自发裂变中子谱作为标准中子能谱来刻度中子探测器的效率有了可靠的依据。据此, 我们用飞行时间法测量<sup>252</sup>Cf 10 MeV 以下自发裂变中子谱, 并由此精确地得出探测器的效率。

## 2 实验测量

### 2.1 <sup>252</sup>Cf 快电离室

在刻度实验中, 使用了专用于刻度中子探测效率的<sup>252</sup>Cf 微型电离室<sup>[6]</sup>, 其结构如图 1 所示。快电离室由不锈钢制成, 其壁厚为 0.15 mm, 气室的直径为 14 mm 和高度为 7 mm, 流气管的外径为 1.6 mm, 内径为 1 mm。收集电极为直径 10 mm 和厚度 0.1 mm 的不锈钢片, <sup>252</sup>Cf 源通过自转移方法沉积在直径为 18 mm 和厚度为 0.1 mm 的经过细致

\* 收稿日期: 2010-04-17; 修改日期: 2010-09-11

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475068)

作者简介: 张文慧(1984-), 男(汉族), 甘肃平凉人, 硕士, 从事核技术应用研究; E-mail: haleiwenhui@163.com

# 通讯联系人: 黎光武, E-mail: gwli@ciae.ac.cn

抛光的不锈钢片上,其自发裂变强度约为  $1.0 \times 10^3$  Bq,源斑直径为 6 mm,收集电极与源片之间的距离为 2 mm,使用 Lemo 插头引出信号。整个电离室的结构材料比较少,总质量约为 1 g,极大地减小了由中子散射引起的裂变中子能谱畸变。

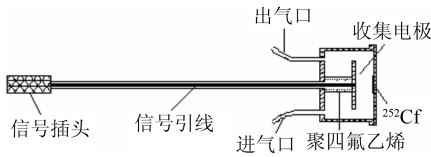


图 1  $^{252}\text{Cf}$  快电离室结构图

图 2 给出了使用该电离室在不同工作电压下测量得到的  $^{252}\text{Cf}$  自发裂变碎片的脉冲幅度谱。电离室的工作气体为纯度 99.99% 的甲烷,工作气压约为一个大气压。从图 2 可以看出,在脉冲幅度谱上裂变碎片部分与  $\alpha$  粒子及噪声部分能够明显分开。

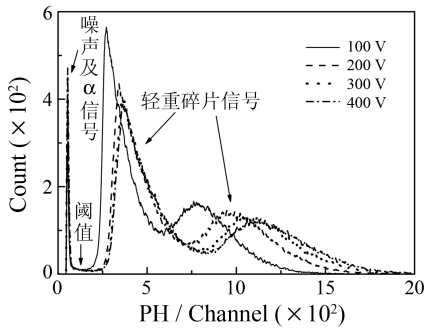


图 2  $^{252}\text{Cf}$  裂变碎片脉冲幅度谱

## 2.2 实验测量

采用中子飞行时间方法,由待测中子探测器测得的中子能谱与标准中子能谱作比较,既可得该探测器的中子探测效率。中子探测器是由直径为 108 mm 和厚度为 54 mm 的 LS301 液体闪烁体和一支 XP4512 快速光电倍增管组成。

微型电离室收集电极的电流信号输入前放 OR-TEC 142B,其时间信号馈入快放 FTA820,通过恒比定时 CF8000 引出碎片的定时信号,经过 40 m 延迟线延迟后再进入 CF8000 整形,作为中子飞行时间的 Stop 信号,而能量信号直接由主放 OR-TEC572 放大后进入 ADC1,得到电离室的脉冲幅度谱,以供数据处理时定出裂变碎片的甄别阈。中子飞行时间的 Start 信号直接由探测器的阳极信号经 CF8000 定时提供。实验中采用了过零时间法来

进行 n- $\gamma$  分辨,使用的插件是 CANBERRA-2160A,得到的分辨效果如图 3 所示。通过在脉冲幅度-n- $\gamma$  分辨二维谱上选定的中子区域挑出中子事件,该区域通常靠近  $\gamma$  一侧,其目的是保证选出的中子不被丢失而甄别掉大部分  $\gamma$  射线;另一方面,也是为了在飞行时间谱上能够明显保留  $\gamma$  峰,以便确定中子飞行的起始时刻;更重要的是用来监测整个谱仪长期工作的稳定性。注意到  $^{252}\text{Cf}$  裂变中子能谱与碎块相对于源衬底的发射角之间的差异,我们使  $^{252}\text{Cf}$  面向中子探测器,源与闪烁体中心的距离为  $(105 \pm 1)$  cm。为了减少散射本底,中子探测器被置于离地面 2 m 高的一个支架上,整个装置安放在一宽敞大厅内,使源周围 3 m 内无任何遮挡物,这样可以更好地降低散射本底的干扰。图 4 给出了实验测量得到的探测器能量阈分别为 0.5, 0.7, 1.0 和 1.6 MeV 的瞬发中子飞行时间谱。

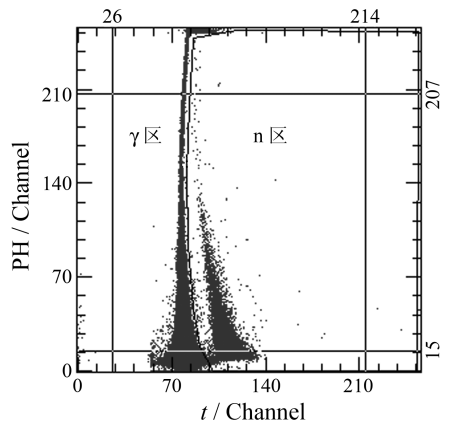


图 3 n- $\gamma$  分辨二维效果图

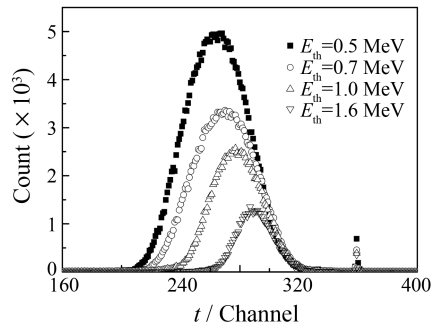


图 4  $^{252}\text{Cf}$  瞬发裂变中子飞行时间谱

## 3 数据处理和修正

### 3.1 $\gamma$ 刻度

在正式实验之前,需要用不同能量的  $\gamma$  源对

ADC 进行能量刻度以获得数据获取系统 ADC 道数和等效电子能量的关系,判断 ADC 是否线性;同时还可以确定探测器的硬件阈值,也为之后求不同阈下探测效率曲线提供了标准。 $\gamma$  射线进入液闪后主要发生康普顿散射产生康普顿电子,所以只要确定最大康普顿散射电子能量( $E_c$ )所对应的道数,就可以获得道数和等效电子能量的关系曲线。本次实验用到的  $\gamma$  源及其对应的康普顿散射能量如表 1 所示,最终刻度结果为  $E_e = 6.52879 + 2.5718 \times \text{PH}$ 。

表 1 实验所用  $\gamma$  源参数列表

$\gamma$ 源名称	全能峰能量/keV	$E_c$ /keV
$^{22}\text{Na}$	511	341
	1274.53	1061
$^{137}\text{Cs}$	662	478

### 3.2 数据结果修正

对实验测得的中子飞行时间(TOF)谱作如下本底扣除及修正:

#### (1) 随机本底

随机本底是由无时间关联的起始和停止事件的偶然符合造成的。由谱的瞬发  $\gamma$  峰以上的道数求得每道平均计数率,从整个 TOF 谱上逐道扣除。

#### (2) $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变中子谱的修正

$^{252}\text{Cf}$  自发裂变中子谱相对于核温度 1.42 MeV 的 Maxwellian 分布,在 0.2—1.2 和 5.0 MeV 以上

有负的偏差,而在 1.2—4.5 MeV 有正的偏差<sup>[5]</sup>。其修正  $\mu(E_i)$  定义为

$$\mu(E_i) = \frac{N_{\text{Exp}}(E_i)}{N_{\text{max}}(E_i)}。$$

对  $\mu(E_i)$  取 Boldman<sup>[7]</sup> 的实验数据,精度达到  $\pm 0.007 - \pm 0.014$ 。

#### (3) 其他修正

$^{252}\text{Cf}$  瞬发裂变中子在源衬底和电离室的壁上散射而引起中子谱的畸变,从文献[8]看出,0.9 g 的电离室,散射中子对源中子谱的所占份额随能量分布不同:0.5 MeV 以下约占 1.5%;0.5—1.0 MeV 约占 1.2%;1.0—2.0 MeV 约占 0.7%;2.0 MeV 以上小于 0.5%,并随能量增加而下降。我们涉及的能量从 0.5—2.0 MeV,平均以 1.0% 做修正,而 2.0 MeV 以上的未做修正,因为该能区计数的统计误差和其他误差大于这项修正。

## 4 误差分析及结果讨论

实验测量和理论计算的结果示于图 5,图中误差棒是实验能点的统计误差。其中理论计算是通过德国 PTB 实验室专门用于计算液闪探测器探测效率曲线的 NEFF50 程序得到。有了准确的探测器的光响应函数,即可较准确地计算探测器的效率曲线。本程序可计算中子能量从 0.05 MeV 到 50

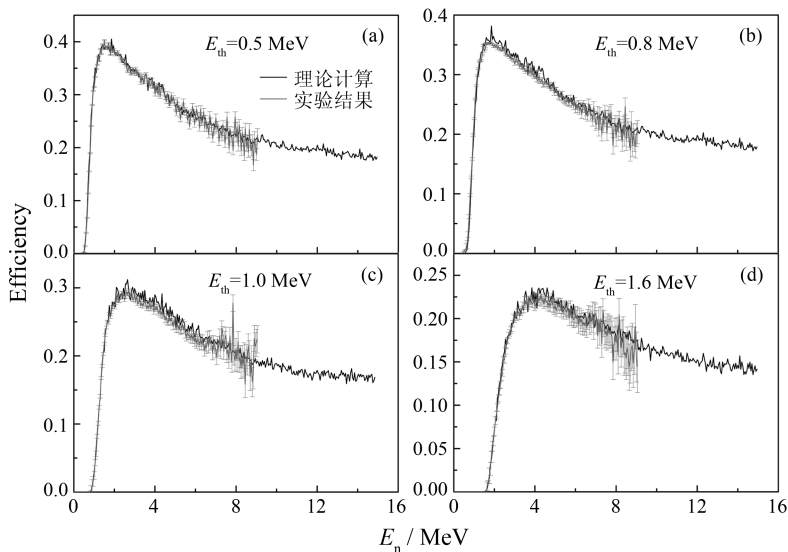


图 5 LS301 型快中子探测器在不同阈值下的相对效率曲线

MeV 能区的探测器效率。

由图 5 给出的不同硬件阈上中子探测效率表明: (1)随着中子能量的增加,实测效率曲线与理论计算曲线偏差有越来越大的趋势;(2)随着阈的升高,理论和实验之间的偏差越来越大;(3)在同一个能量点,探测效率随着阈值的增加而减小;(4)出现偏差的中子能量始于 6.0 MeV,越到高能端误差带越宽。

实验测得效率的误差,除了标准谱的误差外,在 2.0 MeV 以下,误差主要来自散射本底;在 2.0 MeV 以上主要误差来自计数的统计误差,而在 6.0 MeV 以上,由于电离室源的活度较低,计数的统计误差尤为明显。

能量一定的中子在探测器中产生的信号幅度是不一定的,而是处于某一分布状态。当阈值较低时(如 0.7 MeV),信号幅度低的中子也能被记录到;而当阈值高时,信号幅度低的中子就不能被记录到。因此阈值低时的探测效率比阈值高时的探测效率要高些。

在整个低能区范围,效率曲线的理论计算和实验测量结果符合得很好。但在 6.0 MeV 以上,由于<sup>252</sup>Cf 源活度较低,中子谱高能中子成分减少以及飞行距离和时间分辨的限制,误差将超过 10%,是不可取的。

## 5 总结

在 6 MeV 以下的中子能区,通过<sup>252</sup>Cf 微型电离室法刻度液闪中子探测器的效率曲线是一种较好的方法,中子探测效率的实验刻度值与理论计算结

果也符合得很好。但在更高的能区,由于裂变瞬发中子的计数小,存在较大的统计涨落,导致探测器的探测效率的实验刻度值的误差偏大。为提高 6.0—10.0 MeV 范围的测量精度,可用活度更大的<sup>252</sup>Cf 源并增加测量时间是可以达到的。对于 10 MeV 以上的情形,由于<sup>252</sup>Cf 中子谱高能中子成分减少,又加上飞行距离和时间分辨的限制,误差会更大,这种方法将不太适用。

## 参考文献 (References):

- [1] Drog M. Nucl Instr and Meth, 1972, **105**(3): 573.
- [2] Shen Guanren, Sa Jun, Huang Tangzi, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 1987, **21**(1): 9(in Chinese).  
(沈冠仁, 撒骏, 黄糖籽, 等. 原子能科学技术, 1987, **21**(1): 9.)
- [3] Chen Jinxiang, Shi Zhaomin, Tang Guoyou. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1993, **13**(6): 323 (in Chinese).  
(陈金象, 施兆民, 唐国有. 核电子学与探测技术, 1993, **13**(6): 323.)
- [4] Proc IAEA consultants Mtg. Prompt Fission Neutron Spectra. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1971, 169.
- [5] Boldeman J W. Summary of Workshop 1, the <sup>252</sup>Cf Fission Neutron Spectrum. IAEA-TECDOC-410, 1987, 9—10.
- [6] Gu Xianbao, Li Guangwu, Zhang Wenhui, *et al.* Nuclear Physics Review, 2009, **26**(1): 37(in Chinese).  
(顾先宝, 黎光武, 张文慧, 等. 原子核物理评论, 2009, **26**(1): 37.)
- [7] Boldeman J W, Clancy B E, Culley D. Nuclear Science Engineering, 1986, **93**: 181.
- [8] Chalupka A. Nucl Instr and Meth, 1979, **164**(1): 105.

## Calibration of LS301 Fast-neutron Detector Efficiency<sup>\*</sup>

ZHANG Wen-hui<sup>1, 2</sup>, LI Guang-wu<sup>1, #</sup>, ZHANG Gang<sup>1, 3</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, YAN Guo-hong<sup>1, 3</sup>

(1 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi, China)

**Abstract:** Neutron detection efficiency of LS301 fast-neutron detector was calibrated by measuring the

\* Received date: 17 Apr. 2010; Revised date: 11 Sep. 2010

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10475068)

# Corresponding author: Li Guang-wu, E-mail: gwli@ciae.ac.cn

neutron energy spectrum of  $^{252}\text{Cf}$  source, which has a standard fission neutron spectrum. A low mass, fast ionization chamber is used as the fission fragments detector in the time-of-flight (TOF) spectrometer and afforded the start signal of neutron flight. The stop signal was offered by the anode of LS301. A measured TOF spectrum was turned to the neutron energy spectrum which will be compared with the standard one. Consequently, the fast-neutron detection efficiency of LS301 was obtained. Calibration procedures of experimental and data processing was given. Relative detection efficiencies were obtained separately for threshold settings of 0.5, 0.7, 1.0 and 1.6 MeV for neutron energies under 10 MeV. Experimental results accorded with theoretical efficiency curves which were calculated with the Monte Carlo code NEFF50.

**Key words:**  $^{252}\text{Cf}$  chamber; LS301 fast neutron detector; neutron detection efficiency; time of flight